第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

DOI:10.13866/j.azr.2022.05.02

祁连山地区夏季南坡与北坡空中云水资源差异性分析

把 黎[1,2], 尹宪志[1], 庞朝云[1], 程 鹏[3], 刘维成[4], 王研峰[1]

(1. 甘肃省人工影响天气办公室,甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081; 3. 甘肃省气象服务中心,甘肃 兰州 730020; 4. 兰州中心气象台,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的高时空分辨率ERA5再分析资料,对祁连山地区夏季空中云水资源的时空分布及南北坡差异特征进行研究,并估算水汽凝结效率及水凝物降水效率。研究表明:大气环流以及地形引起的低层水汽场辐合和上升气流对祁连山地区空中云水资源分布起到关键作用。(1) 在平均状态下,祁连山地区夏季水汽含量南坡略小于北坡,云水路径南坡大于北坡,南坡500 hPa以下是云液水含量富集区。近年来,水汽含量及云液水含量呈上升趋势,且南坡增速大于北坡;云冰水含量呈下降趋势,且北坡下降速度大于南坡。(2) 夏季白天北坡存在定常性上升气流,且该上升气流可持续到对流层中层,南坡低层为水汽通量辐合区。(3) 在不同降水环流下,偏西或西北气流形势时,北坡云水分布较南坡更为充沛,且多以含水性低云为主;西南气流形势时,云水厚度更深,南北坡云水差异不大。(4) 祁连山区尤其是南坡,空中云水资源相对丰富,且较大部分水凝物未能成为降水,增雨潜力更高,但其云水分布并不固定,也与降水环流形势有关。因此,祁连山上空云水资源分布的不均匀性及多变性需要在开发过程中更有针对性的选择作业区域及作业手段。

关键词:祁连山; 南北坡差异; 云水资源

祁连山地处西北干旱半干旱区腹地,在我国"两屏三带"生态安全战略中发挥"青藏高原生态屏障"和"北方防沙带"的作用,也是我国重点生态功能区中的"水源涵养重要区"[1-2]。近年来,随着全球气候变暖、社会经济发展及生态环境变化,祁连山地区局部水资源短缺问题日益突出,解决水资源问题对于缓解干旱、乃至区域经济及生态环境的可持续发展具有重要作用[3-6]。云水资源作为水循环的重要环节及水资源存储形式之一,储量大、利用率低,也是人工干预可以直接开发利用的水资源,通过人工增雨技术开发云水资源,增加地表水是解决区域水资源短缺科学而有效的途径[7-10]。然而,判断最佳增雨潜力区是一个非常复杂的科学问题,水汽、云水分布及含量、上升气流、降水效率等均是需要考虑的因素,了解影响增雨潜力的要素,对于准确识别作业条件和科学实施催化作业从而提高云水资源开发利用效率具有重要意义[11-13]。

以往研究表明,祁连山上空云水资源丰富,地形云的存在使其较周围平原地区存在更高的增雨潜力,尤其夏季降水效率及人工增雨潜力最大[14-17]。而山区云水资源受地形、大气环流、水汽分布与传输等因素的影响空间格局特征鲜明[18-21],对祁连山而言,其地处西风带、偏南季风和东亚季风影响的交汇地带[22-23],上空云系分布复杂、云水分布不均匀、变率大,为增雨作业带来了不确定性[24-27]。一些学者已经注意到其上空水汽及云的宏微观物理特性存在南北坡差异,郑国光等[28]在祁连山区夏季开展地形云综合探测实验得到山区及南坡的降水及水汽密度大于北坡;张杰等[29]对祁连山上空18次大范围云覆盖过程卫星反演得到,南坡海拔4300 mm左右云液水含量、光学厚度等参数达到最高,而北坡随高度升高云参数均呈下降趋势;程鹏等[30]利用

收稿日期:2021-12-14; **修订日期**:2022-06-13
基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK010405);西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验(RYSY201901);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z036);国家重点研发计划(2019YFC1510302);甘肃省自然科学基金(21JR7RA710)
作者简介:把黎(1990-),女,工程师,主要从事云降水与人工影响天气研究. E-mail: bllnuist@hotmail.com
通讯作者:尹宪志. E-mail: lbz319@aliyun.com

祁连山一次地形云降水过程的飞机观测数据，得到云系翻越祁连山过程中南北坡云微物理特征有明显变化，北坡（背风坡）粒子浓度、直径和液态水含量明显大于南坡（迎风坡）。上述研究丰富了我们在祁连山云物理及人工增雨方面的认识，但对于云水在南北坡差异性的平均分布状况及成因、云水的垂直分布特征、不同环流形势下的云水差异性等相关研究还缺乏详细分析，而了解祁连山上空南北坡的云水差异及多变性，可以为在增雨过程中更有针对性的选择作业区域及作业手段提供参考依据。另外，祁连山南北坡气候差异较大[31-32]，近年来，在气候暖湿化增强东扩的背景下[33-34]，其两侧的云水资源变化也更为复杂，因此，了解新气候形势下祁连山地区的云水差异及其变化趋势具有重要意义。

以往对祁连山上空云水的探测手段主要基于卫星和飞机探测开展，飞机穿云作为最直接有效的观测手段，其获取的样本数量有限；而传统的基于被动式传感器的卫星资料由于观测手段的限制也只能粗略估计云的位置和垂直范围[35]。与之相比，本研究用到的ERA5再分析资料具有资料均一化、时空分辨率更高、时间尺度更长的优点，通过多模式资料对比及与卫星资料检验表明，再分析资料与观测的云水分布具有较高的一致性，并且ERA5在东亚地区对深对流结构的描述更接近，对多云大气的再分析能力最强[36-38]。随着模式方案的改进，再分析资料近年来也被逐步应用在对高海拔山地空中水资源的研究中[39-41]，弥补了西北复杂地形条件下观测资料的不足。基于上述手段获得的云水量是在特定时间内观测到的状态量，从人工增雨的角度讲，在考虑区域水成物收支的基础上，重新定义云水资源以及由此得到的降水效率，对人工影响天气具有重要意义[42]。为此，本研究以高分辨率的再分析资料为研究基础，对祁连山地区夏季南北坡空中云水资源的差异特征进行分析，并试图探索这种南北差异形成的原因，最后对祁连山区的水汽凝结效率和水凝物降水效率进行评估，为后期更有针对性的开展人工增雨作业及云和降水物理过程参数化方案等相关研究和应用提供可参考性依据。

1 研究区概况及资料

1.1 祁连山地区概况

祁连山地处青藏高原东北边缘，其北部为河西走廊，四周戈壁沙漠环抱，地理位置为94°~104°E，36°~40°N，由数条西西北-东东南走向的平行山峰和宽谷组成，平均海拔1700~5800 m。广义上的南坡指祁连山在青海一侧，北坡指甘肃一侧。本文取祁连山中段冷龙岭的南北坡作为主要研究区域（99.5°~101°E，37.5°~39°N，图1），冷龙岭主峰海拔5000 m，北坡地势陡峭，到河西走廊地势高度迅速下降到1500 m，南坡相对平缓，地势高差较小。

1.2 资料及其适用性

所用资料包括：（1）1979—2019年6—8月ERA5再分析资料（空间分辨率0.25°×0.25°，时间分辨率1

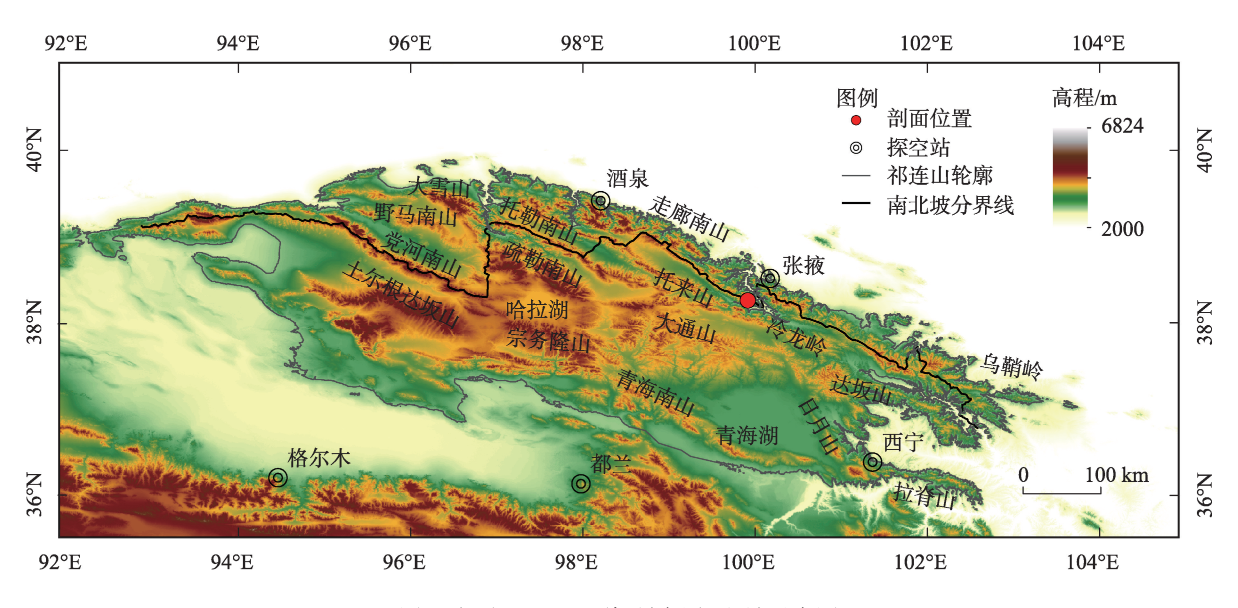


图1 祁连山地区地貌及周边探空站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of landform and surrounding sounding stations in Qilian Mountain area

h，垂直方向从1000~100 hPa，共27层），该资料生成使用了ECMWF集成预报系统（Integrated Forecast System, IFS）CY41R2全球谱模式，改进了四维变分（4D-Var）方案，并在同化系统中增加了更多历史观测数据，特别是在同化系统和模式系统中加入了卫星数据，改进了地表参数化和云降水模式[43-44]；（2）祁连山区周边5个探空站资料。研究所用公式如下：

整层大气可降水量（ PW ）计算公式：

$$PW = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{100} q\mathrm{d}P \quad (1)$$

整层大气水汽通量（ Q ）计算公式：

$$Q = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{100} Vq\,\mathrm{d}P \quad (2)$$

整层纬向水汽通量（ Q_λ ）计算公式：

$$Q_\lambda = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{100} uq\,\mathrm{d}P \quad (3)$$

整层经向水汽通量（ Q_φ ）计算公式：

$$Q_\varphi = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{100} vq\,\mathrm{d}P \quad (4)$$

单层大气水汽通量散度（ A ）计算公式：

$$A = -\frac{1}{g}\nabla\cdot(Vq) \quad (5)$$

式中：q 为单位气柱的比湿；V 为风向；u 和 v 分别为纬向和经向风分量；P 为气压；P_s 为随 λ 和 φ 变化的地表气压；g 为重力加速度；∇ 为散度算子。由于100 hPa以上高度的水汽输送很小，这里积分高度选取100 hPa[45]。

格点平均云液水（云冰水）含量（ l ）公式为[43]：

$$l = \frac{1}{V}\int_V \frac{\rho_w}{\rho}\mathrm{d}V \quad (6)$$

式中：ρ_w 是云液水（冰水）密度；ρ 是湿空气密度；V 是格点区域的体积。云水路径是整层云液（冰）水含量总和。

对祁连山区水汽凝结效率和水凝物降水效率的估算采用中国气象科学研究院人工影响天气中心建立的CWR-MEM方案（Cloud Water Resource-Monitoring and Evaluation Method）[46-47]。

区域内水汽和水凝物的平衡方程为：

$$Q_v = Q_{v0} + Q_{vip} + Q_{ev} + Q_e \quad (7)$$

$$Q_h = Q_{h0} + Q_{hip} + Q_c \quad (8)$$

水汽凝结效率（ P ）的公式为：

$$P = Q_{tc}/Q_v \quad (9)$$

水凝物降水效率（ E_h ）的公式为：

$$E_h = R/Q_h \quad (10)$$

式中：Q_v 为水汽总量；Q_{v0} 为水汽初值；Q_{vip} 为水汽输入；Q_{ev} 为地面蒸发；Q_e 为蒸发；Q_h 为水凝物总量；Q_{h0} 为水凝物初值；Q_{hip} 为水凝物输入；Q_c 为凝结；Q_{tc} 为总凝结量；R 为降水总量。

用ERA5格点资料与祁连山周边5个探空站比湿资料进行对比分析，结果均通过99%置信水平（表1），说明ERA5再分析资料可用于对祁连山地区水汽特征的分析。

表1　ERA5格点数据与探空站比湿相关性检验

Tab. 1　Correlation test of specific humidity between ERA5 grid data and sounding station

站名	海拔/m	经度	纬度	相关系数
酒泉	1479	98.29°E	39.46°N	0.96
张掖	1483	100.26°E	38.56°N	0.95
格尔木	2812	94.54°E	36.25°N	0.94
都兰	3191	98.06°E	36.18°N	0.94
西宁	2299	101.45°E	36.43°N	0.97

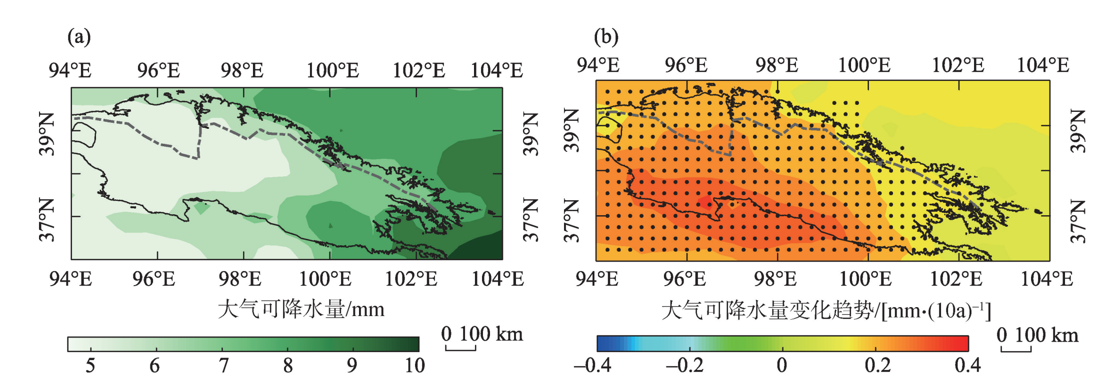
2　祁连山夏季云水资源分布及南北坡差异

2.1　夏季水汽分布

祁连山地区夏季水汽分布表现为东南多于西北，平原、谷地多于山坡（图2a）。99°E以东大部水汽含量在7~10 mm，山区西部有水汽含量不足5 mm的低值中心。南坡青海湖至湟水河谷地一带、北坡地势高度迅速下降处至河西走廊呈现2个西西北-东东南向的水汽含量大值中心，尤其北坡一带水汽湿舌可伸至40°N；北坡水汽含量整体较南坡高。整个区域水汽均呈增加趋势（图2b），增速在0.1~0.4 mm·(10a)$^{-1}$。水汽增速在山区西部大于东部，南坡大于北坡。

2.2　夏季云水分布

祁连山地区夏季云水路径分布整体态势与水汽相似（图3a），东南多西北少，山区显著大于周边，尤其最东一排高山是云水路径的高值区，最高值可达120 g·m^{-2}。整体上，云水路径在南坡略高于北坡，北坡随地势高度下降，云水路径迅速降低。山区大部地区云水路径均呈增多趋势（图3b），增速普



注：黑色实线为祁连山轮廓，黑色点划线为祁连山南北坡分界线，打点区域表示通过95%置信度的显著性检验。下同。

图2 1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)大气可降水量分布和变化趋势

Fig. 2 Distribution and variation trend of precipitable water vapor over the Qilian Mountains in summer during (June-August) 1979–2019

图3 1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)云水路径、云液水含量、云冰水含量分布和变化趋势

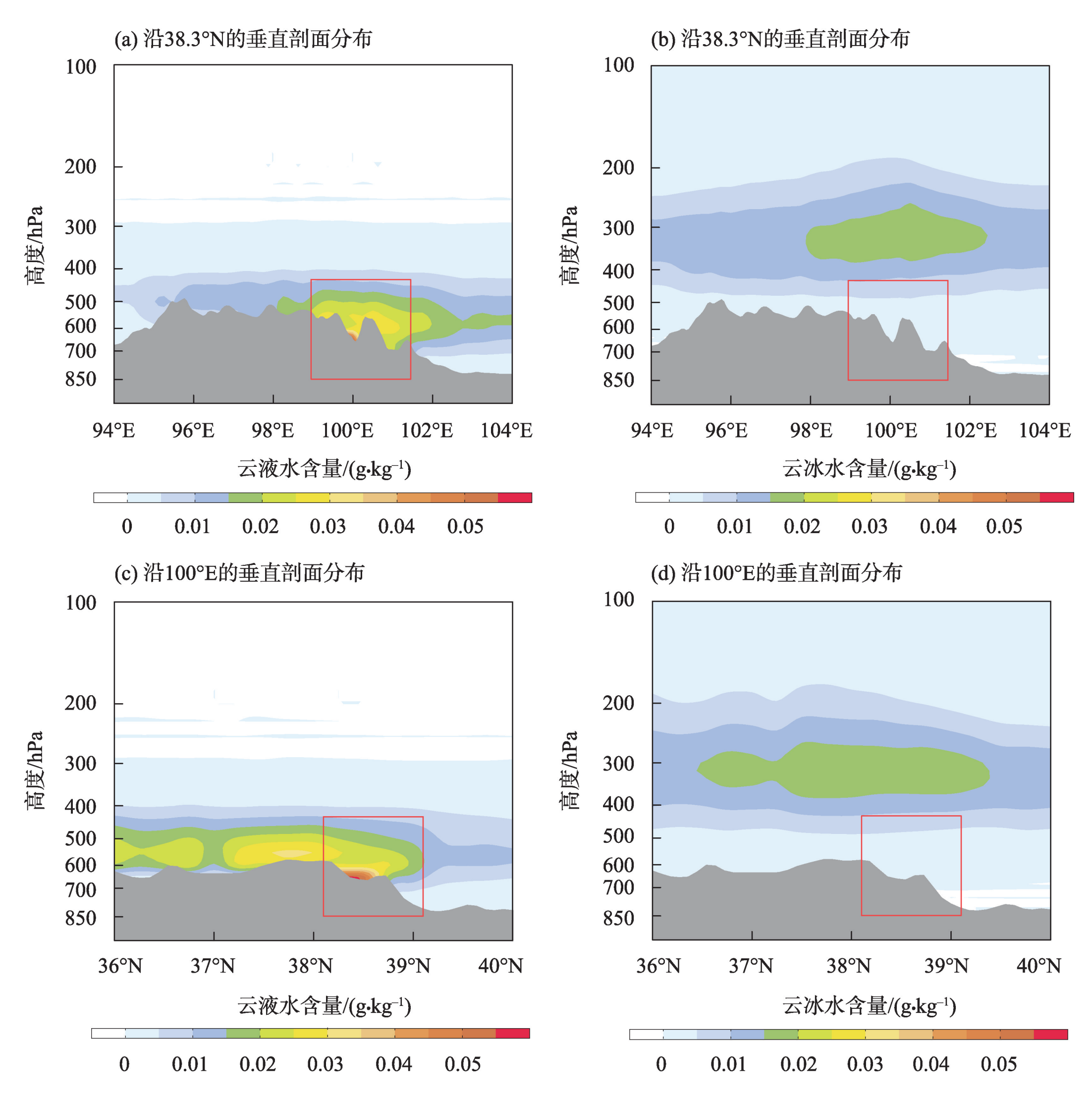
Fig. 3 Distribution and variation trend of cloud water path, cloud liquid water content, cloud ice water content over the Qilian Mountains in summer (June-August) from 1979 to 2019

遍在2~4 g·m⁻²·(10a)⁻¹,只在100°E以东的中东段呈弱减少趋势。整体上,南坡云水路径上升,而北坡云水路径呈弱下降趋势。

云液水含量和云冰水含量分布态势与云水路径分布较为一致(图3c、图3e),云液水含量在南坡的分布较北坡略大。两者变化趋势相反(图3d、图3f),云液水含量在整个区域内均呈增加趋势,尤其在西部增速为4 g·m⁻²·(10a)⁻¹,南坡增速普遍大于北坡;而云冰水含量呈下降趋势,尤其在东段北坡下降趋势较为显著。由此可见,祁连山南坡云水路径上升主要由云液水含量增多引起,北坡及山区东南部云水路径下降主要由云冰水含量减少引起。

进一步分析,祁连山地区夏季云液水含量和云冰水含量沿38.3°N的纬向剖面和沿100°E的经向剖面(图4)。由图可见,云液水含量在垂直方向的最大高度在300 hPa附近(图4a、图4c),高值区(大于0.025 g·kg⁻¹)主要集中在山脉和南坡低层500 hPa以下,云液水含量最大值在冷龙岭南坡600 hPa以下的谷地可达0.055 g·kg⁻¹。云冰水含量主要集中在500~200 hPa之间(图4b、图4d),高值区(大于0.02 g·kg⁻¹)在300 hPa上下,云冰水含量覆盖范围较广,在南北坡分布无明显差异。

东亚地区云液水含量存在2个高度上的峰值区,0.5~1.0 km和3.5~4.5 km,发展上限在9 km高度附近;云冰水含量的垂直高度中心在8 km左右,发展上限在19 km附近,其中青藏高原地区由于地势



注:灰色阴影为地形,红色方框为冷龙岭地区。下同。

图4　1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)云液水含量和云冰水含量沿38.3°N和100°E的垂直剖面分布

Fig. 4　Vertical profile distribution of cloud liquid water content and cloud ice water content along 38.3°N and 100°E in summer (June-August) over the Qilian Mountains from 1979 to 2019

高，夏季热力作用明显，对流发展旺盛，云液水及云冰水含量中心高度高于平均值，上限发展高度高于平原地区[48-52]。祁连山区云水含量垂直分布特征与前人研究结果一致。

3 祁连山夏季南北坡云水资源差异性原因

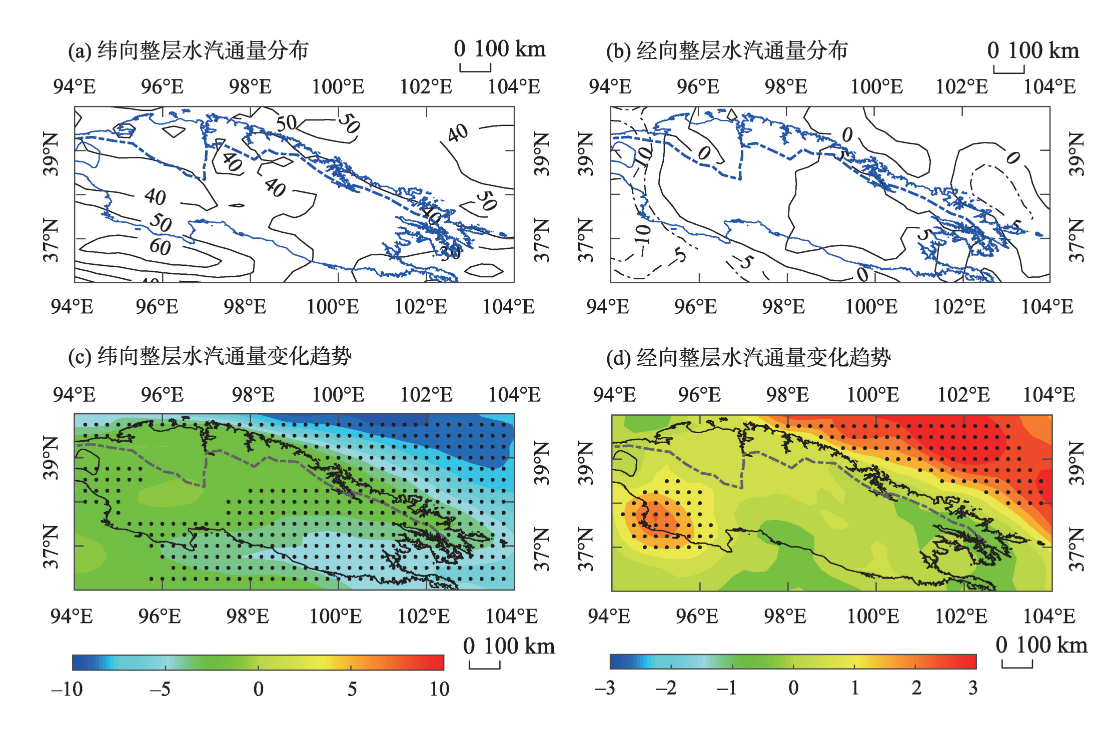
综上所述，祁连山地区夏季水汽含量及云水路径在南坡和北坡的分布存在差异，南坡水汽含量略小于北坡，但云水路径大于北坡；两者在南坡与北坡也呈现出不同的变化趋势，水汽含量在整个区域内均呈上升趋势，且南坡增速大于北坡，而云水路径在南坡呈上升趋势，北坡及山区中东段呈弱下降趋势，且南坡的云水路径上升主要由云液水含量在南坡的上升主导，北坡及山区中东段云水路径的下降主要由云冰水含量在上述地区的下降主导。为分析这种南北差异形成的原因，对祁连山地区夏季水汽输送及水汽通量散度和平均气流场进行诊断。

3.1 夏季水汽输送

由图5a可知，整个山区均为由西向东的水汽通量，值在40~50 kg·m^{-1}·s^{-1}。经向整层水汽通量的方向为由南向北（图5b），最大水汽通量中心在山区东南部，值为5 kg·m^{-1}·s^{-1}，其北部河西走廊靠近祁连山北坡一带为弱的向南输送的水汽通量，尤其在中东段北坡水汽通量值可达−5 kg·m^{-1}·s^{-1}。综合来看，纬向水汽通量远大于经向水汽通量，量级相差约9倍左右。

从水汽通量的变化趋势看（图5c、图5d），纬向水汽通量在区域内均呈减少趋势，下降速度约在−4~−2 kg·m^{-1}·s^{-1}·(10a)$^{-1}$，也就是说西风水汽输送的影响呈减弱趋势，尤其在中东段南坡减弱趋势更为明显；而经向水汽通量呈增多趋势，尤其在河西走廊至北坡一带增强趋势较为明显，值约为3 kg·m^{-1}·s^{-1}·(10a)$^{-1}$，中东段水汽通量的变化趋势不显著。

由此可见，祁连山地区夏季的水汽来源主要依靠中纬度西风带对水汽的输送，但是近年来西风环流对水汽的输送呈减弱趋势，而夏季风受地形阻挡，只能输送少量的水汽到达祁连山中东段南坡，虽然这部分从海洋吹来的水汽通量值很小，但是依然对祁连山地区水汽的分布起到重要作用。还可以看到，祁连山中东段河西走廊靠近北坡一带存在向南输送的弱水汽通量，且该向南的水汽通量呈增大的趋势，并与南坡向北输送的水汽通量在山脉处



注：实线代表向东、向北的水汽通量；虚线代表向西、向南的水汽通量；水汽通量单位为kg·m^{-1}·s^{-1}；水汽通量变化趋势单位为kg·m^{-1}·s^{-1}·(10a)$^{-1}$。

图5 1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)整层纬向和经向水汽通量分布和变化趋势

Fig. 5 Distribution and variation trend of latitudinal and meridional water vapor transport flux over the Qilian Mountains in summer (June-August) from 1979 to 2019

汇合,对中东段云水资源的分布起到了重要作用。

从650 hPa平均水汽通量及风场的分布情况和变化趋势看(图6),中东部水汽输送可达100°E,37.5°N左右,笔者认为是夏季风能到达的平均位置,以往研究也认为,东亚季风的影响区域最西可达100°E,北缘在33°~44°N摆动[53-54]。而近年来,该东南方向水汽输送呈增大趋势,最大增速可达20 g·hPa^{-1}·cm^{-1}·s^{-1}·$(10a)^{-1}$。区域内550 hPa及以上转为西风纬向输送。由此可见,夏季风对水汽的输送主要集中在中低层,并使祁连山地区夏季的水汽分布呈现东高西低的态势。

3.2　夏季水汽通量散度及平均气流

由图7a可见,白天沿38.3°N的纬向剖面上,祁连山东坡为水汽通量辐散区,西坡在96°~100°E范围内550 hPa以下均为水汽通量辐合区,最强辐合中心达-1.2×10^{-7} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}。从103°E处开始,沿东坡出现了偏东风上升气流,该上升气流一直伸入西坡,高度可达400 hPa以上。而夜间(图7b),东坡低层为水汽通量辐合区,西坡低层为水汽通量辐散区,夜间东坡主要以弱下沉气流为主。

从沿100°E的经向剖面上看(图7c、图7d),北坡为水汽通量辐散区,南坡在37.5°~38.5°N的范围内550 hPa以下为水汽通量辐合区,辐合中心强度为-2.4×10^{-7} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}。沿北坡存在偏北风上升气流,该上升气流一直伸入南坡,高度可达400 hPa以上,在山峰处,有中心强度为0.3 Pa·s^{-1}的垂直上升速度。夜间南北坡水汽通量散度的分布情况与纬向剖面相似。

也就是说,祁连山地区夏季白天北坡存在定常性上升气流,这支来自北坡的偏东北气流携带该地区相对较为丰富的水汽爬坡、向南坡输送,且该上升气流可持续到对流层中层,而南坡低层550 hPa以下为水汽通量辐合区,辐合区域主要位于96°~100°E,37.5°~38.5°N范围内。结合图4分析可知,祁连山地区夏季云液水含量的大值区对应低层水汽通量辐合区,而山峰至南坡一带一直持续到对流层中上层的上升运动,对应山峰至南坡整层较高的云水含量。因此,可以看到祁连山地形引起的辐合对水汽在该地区起到再分配的作用,配合定常性上升气流决定了云水含量的南北坡差异。

综上所述,在大气环流和地形的共同作用下,夏季祁连山地区的云水分布呈现东南多西北少的格局和南多北少的南北坡差异特征。

4　夏季典型降水环流形势下南北坡云水资源差异性

从前文分析得到,祁连山地区的云水分布格局及南北坡差异性特征由大气环流和地形因素共同主导。通过对祁连山上空夏季降水过程的环流形势进行普查得到,降水主要在以冷空气主导的偏西风气流和以偏南暖湿气流主导的环流形势下产生,基于此,对区域内有降水时的高空环流形势进行分型,取30°~45°N范围内500 hPa 110°E格点平均位势高度(H_1)减90°E平均位势高度(H_2)的值作为分型标准,分为2大类型,$H_1-H_2>20$ gpm为西南气流型,$H_1-H_2<20$ gpm为西北或偏西气流型[55]。

从夏季不同降水环流形势下的祁连山地区云

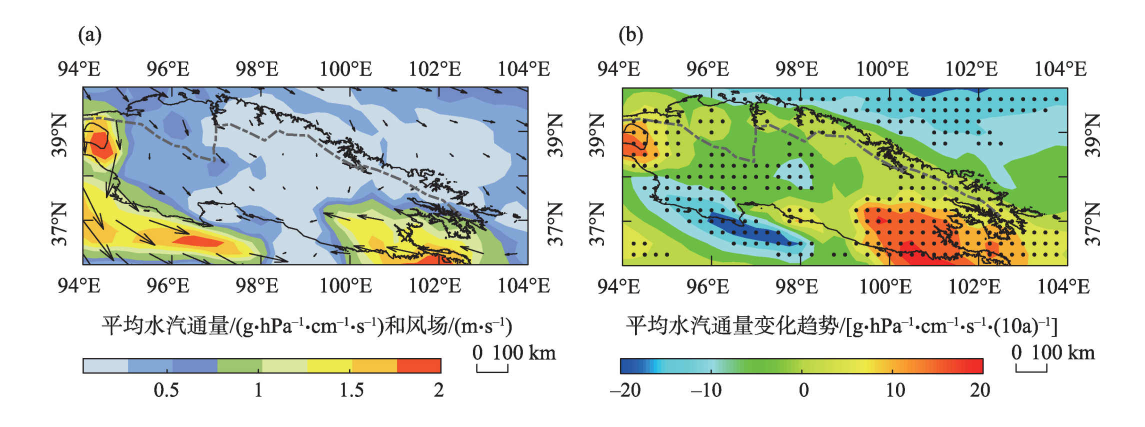
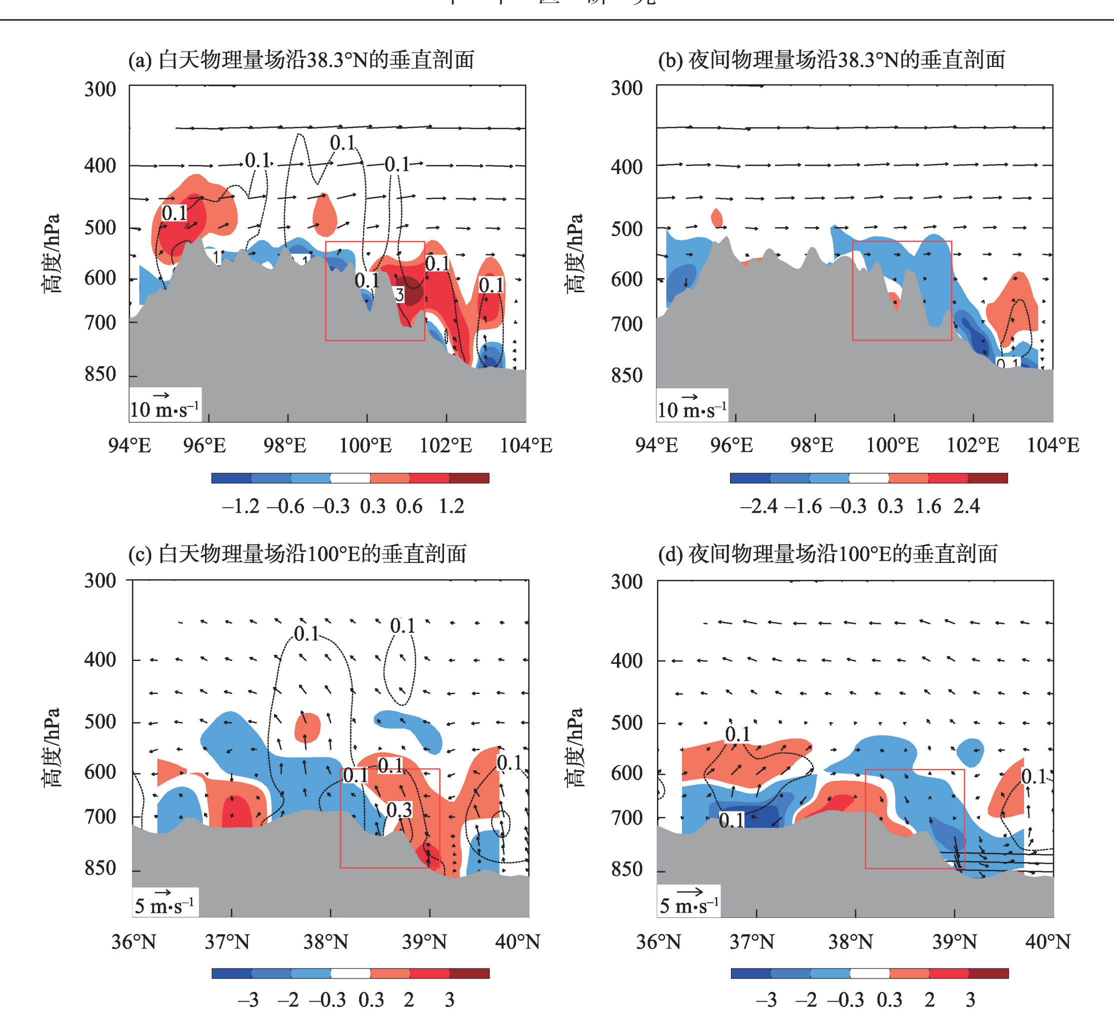


图6　1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)650 hPa平均水汽通量和平均风场分布以及平均水汽通量变化趋势

Fig. 6　Distribution of water vapor fluxes and mean wind field, Variation trend of water vapor fluxes at 650 hPa in summer (June-August) over the Qilian Mountains from 1979 to 2019



注：彩色阴影为水汽通量散度，单位：10^{-7} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}；风场中垂直速度放大了100倍，单位为m·s^{-1}；黑色点线为垂直速度，单位为Pa·s^{-1}。

图7 1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)物理量场在白天和夜间沿38.3°N和100°E的垂直剖面分布

Fig. 7 Physical quantity along 38.3°N and 100°E in day and night over the Qilian Mountains in summer (June-August) from 1979 to 2019

水资源分布形态上看(图8)，在偏西或西北气流形势下，祁连山地区以分布在低层的云液水含量为主，且北坡的云液水含量显著大于南坡，云冰水含量主要分布在400 hPa左右，量级在0.03 g·kg^{-1}；而在偏南气流形势下，祁连山南北坡低层的云水含量均较大，且云液水厚度向上伸展到400 hPa，高层云冰水含量也较大，中心在300 hPa左右，量级大于0.05 g·kg^{-1}。

由此可见，在不同降水环流形势下，祁连山南北坡云水资源分布存在差异。在偏西或西北气流形势下，祁连山北坡的云水分布较南坡更为充沛，且多以含水性低云为主；而在西南气流形势下，祁连山南北坡的云水差异不大，但云水厚度更深且云冰水含量更大。

5 祁连山地区人工增雨潜力

在判断人工增雨潜力时，大气水汽凝结效率和水凝物降水效率是2个重要指标，一般来说，水汽凝结效率较高，水凝物降水效率低的云其增雨潜力大[56]。

由图9可见，山区的水汽凝结效率及水凝物降水效率显著大于周边地区，南坡水汽凝结效率在0.8%以上，而北坡水汽凝结效率在0.3%左右。南坡水凝物降水效率在20%~30%，北坡水凝物降水效率在10%左右。

不同地区的地理环境、气候条件和降水机制不尽相同，因此不便将前人研究结果与本文计算结果进行直接比较，但作为参考仍具有一定意义。前人对水汽凝结效率及水凝物降水效率的研究文章较少，

(a) NW/W气流下云液水垂直剖面

高度/hPa

100 200 300 400 500 600 700 850

94°E 96°E 98°E 100°E 102°E 104°E

云液水含量/(g·kg⁻¹)

0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05

(b) NW/W气流下云冰水垂直剖面

高度/hPa

100 200 300 400 500 600 700 850

94°E 96°E 98°E 100°E 102°E 104°E

云冰水含量/(g·kg⁻¹)

0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05

(c) SW气流下云液水垂直剖面

高度/hPa

100 200 300 400 500 600 700 850

94°E 96°E 98°E 100°E 102°E 104°E

云液水含量/(g·kg⁻¹)

0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05

(d) SW气流下云冰水垂直剖面

高度/hPa

100 200 300 400 500 600 700 850

94°E 96°E 98°E 100°E 102°E 104°E

云冰水含量/(g·kg⁻¹)

0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05

图8　1979—2019年祁连山地区夏季(6—8月)云液水含量和云冰水含量在偏西或西北气流和西南气流下沿38.3°N的垂直剖面

Fig. 8　Vertical profile distribution of cloud liquid water content and cloud ice water content at westerly or northwest wind and southwest wind along 38.3°N in summer (June-August) over the Qilian Mountains from 1979 to 2019

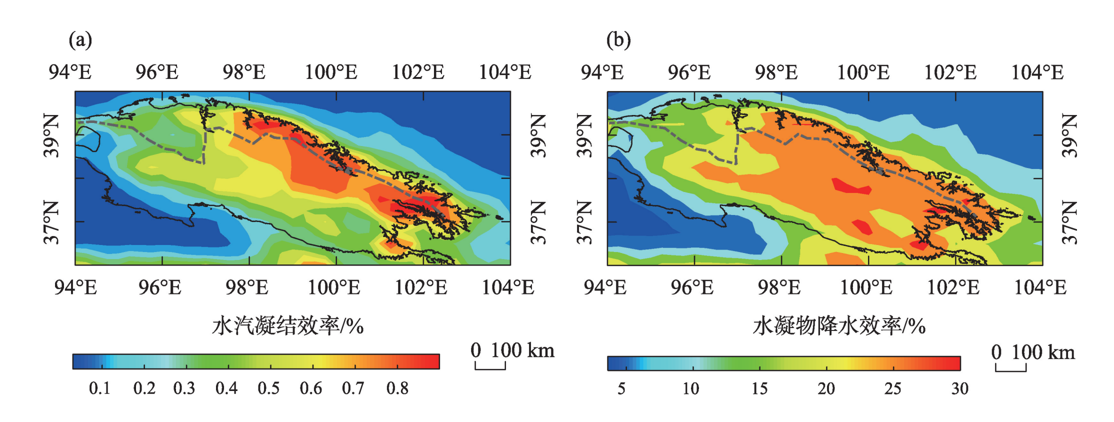


图9　2005—2019年祁连山地区水汽凝结效率和水凝物降水效率分布

Fig. 9　Water vapor condensation efficiency and water condensate precipitation efficiency in the Qilian Mountains from 2005 to 2019

与本文定义比较接近的研究结论如下：张正国[57]、陶玥[58]和张玉欣[59]等计算不同地区的水汽凝结效率，分别为5.3%（广西）、4.77%（北京）和0.3%（青海）；张沛[60]、周非非[61]、陶玥[58]、洪延超[56]、张正国[57]、张玉欣[59]等计算不同地区的水凝物降水效率，分别为44%（六盘山）、69.7%（河南）、44.9%（北京）、40%（郑州）、72.2%（广西）和14%（青海）。就结果来看，祁连山区尤其是南坡，空中云水资源相对丰富，且较大部分的水凝物未能成为降水，空中水资源具有一定开发空间。

6 讨论

研究表明，山区云水分布不均匀、变率大。对夏季祁连山地区而言，云水资源分布东南多西北少的格局主要由大气环流对水汽的输送作用主导；而其在山区大于周边、以及水汽和云水在南北坡的差异特征，则反映了地形因素对于水汽的再分配及对气流的抬升等作用，这一点在干旱半干旱区的山区体现的尤为明显[45, 60, 62]。而对于不同降水环流形势下，祁连山上空云水资源差异性的研究，也体现了地形对云微物理结构的影响是复杂的、多变的，这与刘卫国等[24]对祁连山夏季地形对云微物理模拟的研究结果一致。

在气候变暖的背景下，全球云水资源显著增加，且在中高纬地区尤为显著[63]。中国范围内云水资源总体上与全球变化一致，以增加为主，但存在一定的区域变化差异，以105°E为界，以西呈增加趋势（西藏东部、新疆山区除外），以东呈减少趋势[39, 64]，祁连山所在的高原气候区增长趋势比较明显[65-67]。本文延长研究时段发现，祁连山地区云水变化趋势延续之前的发展态势以增加为主，但存在一定的区域异质性，区域内云液水含量上升而云冰水含量下降，最终体现为南坡云水路径上升而北坡云水路径下降，这与刘菊菊等[68]对高原地区云液水和云冰水分别与气温呈显著正相关及负相关的研究结果一致。简要分析区域内水汽输送的变化趋势发现，近年来西风环流对水汽的输送呈减弱趋势，使得季风携带的水汽更容易向西向北输送，刘玉芝等[69]在大气环流对西北干旱半干旱区气候的影响研究中也得到了相似的结论。由此可见，气候变暖通过影响大气环流变化，从而影响云水生成所需的水汽输送进而影响云水含量，也因此导致了云水的变化在区域内的差异。

当然，云水作为地气系统辐射收支及水循环的重要组成部分，其生成乃至分布受热动力学过程的共同影响是十分复杂的科学过程[70]，不仅仅受大气环流及地形等因素的影响，地表温度、下垫面（如冰川、湖泊、植被等）等因子通过影响区域内的水汽输送及蒸散进而也能影响其上空水汽收支、辐射收支平衡及云的宏微观属性[21, 68, 71-72]，此外，沙尘气溶胶[73-75]在云水的生成过程中也发挥着重要作用，而近年来全球变暖加速水循环使云水的分布及变化趋势更为复杂[63, 76]。本文只对大气环流及地形因素进行了讨论，在后期工作中，全面了解影响祁连山上空云水分布的各项因子，对于深入理解各项因子对云水影响的机理从而更为有效地开展增雨作业具有重要意义。另外，随着搭载主动式传感器，能获得完整云垂直信息卫星的升空及数据积累时间的延长[35, 77]，今后有必要利用长时间序列卫星数据集对本文结果进行对比验证。

7 结论

本文基于ERA5再分析资料对夏季祁连山地区云水含量南北坡差异及变化趋势进行了分析，并探究了差异形成的原因，基于CWR-MEM方案对水汽凝结效率及水凝物降水效率进行了估算。文中对祁连山上空云水资源分布不均匀性及多变性的研究，可为在开发过程中更有针对性的选择作业区域及作业手段提供参考依据。主要结论如下：

（1）祁连山地区夏季水汽含量与云水路径总体分布均呈现东南多西北少的态势，但是在南坡和北坡的分布存在差异，水汽含量南坡略小于北坡，云水路径南坡大于北坡，南坡500 hPa以下是云液态水含量富集区；近年来，水汽含量和云水路径在南坡与北坡也呈现出不同的变化趋势，水汽含量在整个区域内均呈上升趋势，且在南坡增速大于北坡；而云水路径在南坡呈上升趋势，北坡及山区中东段呈弱下降趋势，且南坡的云水路径上升主要由云液水含量在南坡的上升主导，北坡及山区中东段云水路径的下降主要由云冰水含量在上述地区的下降主导。

（2）祁连山地区夏季整层纬向的水汽通量远大

于经向的水汽通量,量级相差约7倍左右,水汽输送主要集中在中低层,西部地区水汽主要来源于西风带的输送,中东部水汽主要来源于东南风的输送,受夏季风对水汽输送的影响,祁连山地区夏季的水汽呈现东高西低的态势;夏季白天南坡低层为水汽通量的辐合,而北坡存在定常性上升气流并一直持续到南坡高层。由此可见,地形引起的低层水汽场的辐合和上升气流对祁连山地区水资源的分布起到关键作用。

（3）在不同降水环流形势下,祁连山南北坡云水资源分布存在差异,偏西或西北气流形势时,北坡云水分布较南坡更为充沛,且多以含水性低云为主;西南气流形势时,云水厚度更深,南北坡云水差异不大。

（4）祁连山区水汽凝结效率在0.3%~0.8%左右,水凝物降水效率在10%~30%左右,对于南坡来说,空中水资源相对丰富且还有相当大部分水凝物未转化为降水,因此空中水资源具有一定开发空间。而其云水资源分布的不均匀性及多变性则需要在开发过程中更有针对性的选择作业区域及作业手段。

参考文献(References):

[1] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928−2937. [Li Xin, Gou Xiaohua, Wang Ninglian, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928−2937.]

[2] Yao Tandong. Tackling on environmental changes in Tibetan Plateau with focus on water, ecosystem and adaptation[J]. Science Bulletin, 2019, 64(7): 417.

[3] 程国栋, 王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 3−14. [Cheng Guodong, Wang Genxu. Changing trend of drought and drought disaster in Northwest China and countermeasures[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 3−14.]

[4] 王静, 尉元明, 郭铌, 等. 祁连山空中云水资源开发利用效益预测与评估[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 463−470. [Wang Jing, Wei Yuanming, Guo Ni, et al. Beneficial prediction and assessment of cloud and air water resource exploitation over the Qilian Mountain[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(3): 463−470.]

[5] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196−211. [Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 196−211.]

[6] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483−493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483−493.]

[7] 张强, 赵映东, 张存杰, 等. 西北干旱区水循环与水资源问题[J]. 干旱气象, 2008, 26(2): 1−8. [Zhang Qiang, Zhao Yingdong, Zhang Cunjie, et al. Issues about hydrological cycle and water resource in arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2008, 26(2): 1−8.]

[8] 王光谦, 钟德钰, 李铁键, 等. 天空河流: 发现、概念及其科学问题[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 649−656. [Wang Guangqian, Zhong Deyu, Li Tiejian, et al. Sky River: Discovery, concept, and implications for future research[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(6): 649−656.]

[9] 李家叶, 李铁键, 王光谦, 等. 空中水资源及其降水转化分析[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2785−2796. [Li Jiaye, Li Tiejian, Wang Guangqian, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2785−2796.]

[10] Cai Miao, Zhou Yuquan, Liu Jianzhao, et al. Quantifying the cloud water resource: Methods based on observational diagnosis and cloud model simulation[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(6): 1256−1270.

[11] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(5): 543−550. [Huang Meiyuan. Urgent problems and thinking of development for precipitation anhancement in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(5): 543−550.]

[12] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 951−967. [Hong Yanchao, Lei Hengchi. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 951−967.]

[13] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008−2012年)[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 351−363. [Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008−2012[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 351−363.]

[14] 陈添宇, 李照荣, 陈乾, 等. 用GMS5卫星反演水汽场分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征[J]. 大气科学, 2005, 29(6): 864−871. [Chen Tianyu, Li Zhaorong, Chen Qian, et al. The analysis of climate characteristics of water vapor distribution over Northwest China with water vapor field retrieved from GMS5 satellite data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(6): 864−871.]

[15] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 717−727.

[Chen Yonghang, Huang Jianping, Wang Tianhe, et al. Temporal and spatial distribution of the different clouds over northwestern China with the relation to precipitation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(6): 717–727.]

[16] 陈乾, 陈添宇, 张鸿. 用Aqua/CERES反演的云参量估算西北区降水效率和人工增雨潜力[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 1–8. [Chen Qian, Chen Tianyu, Zhang Hong. Estimates of precipitation efficiency and latent capacity of artificial precipitation over Northwest china using Aqua/CERES data retrieval of cloud parameters [J]. Arid Meteorology, 2006, 24(4): 1–8.]

[17] 郭良才, 白虎志, 岳虎, 等. 祁连山区空中水汽资源的分布特征及其开发潜力[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 68–73. [Guo Liangcai, Bai Huzhi, Yue Hu, et al. The distributional characteristics and development potential of water vapor resources over Qilian Moutain areas[J]. Resources Science, 2007, 29(2): 68–73.]

[18] Giovannettone J P, Barros A P. Probing regional orographic controls of precipitation and cloudiness in the central Andes using satellite data [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(1): 167–182.

[19] Smith B L, Yuter S E, Neiman P J, et al. Water vapor fluxes and orographic precipitation over northern California associated with a landfalling atmospheric river[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(1): 74–100.

[20] 张小娟, 王军, 黄观, 等. 新疆3大山区云中液态水时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 846–854. [Zhang Xiaojuan, Wang Jun, Huang Guan, et al. Spatiotemporal distribution of cloud liquid water volume over three main mountains in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 846–854.]

[21] 刘玉芝, 常姝婷, 华珊, 等. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展[J]. 气象学报, 2018, 76(3): 485–492. [Liu Yuzhi, Chang Shuting, Hua Shan, et al. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(3): 485–492.]

[22] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432–438. [Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432–438.]

[23] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633–643. [Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65 (4): 633–643.]

[24] 刘卫国, 刘奇俊. 祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(I): 模式云物理方案和地形云结构[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 1–15. [Liu Weiguo, Liu Qijun. The numerical simulation of orographic cloud structure and cloud microphysical processes in Qilian Mountains in summer. part(I): Cloud microphysical scheme and orographic cloud stucture[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26 (1): 1–15.]

[25] 张强, 孙昭萱, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 381–390. [Zhang Qiang, Sun Zhaoxuan, Chen Lihua, et al. Reviews on studies of exploitation and utilization of cloud-water resource in the Qilian Mountains region[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 381–390.]

[26] 杜亮亮, 李江萍, 陈晓燕, 等. 2001–2011年青藏高原东北边坡地带云水资源分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 862–869. [Du Liangliang, Li Jiangping, Chen Xiaoyan, et al. Analysis on cloud and vapor flux in the northeast of the Qinghai-Tibet Plateau during the period from 2001 to 2011[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 862–869.]

[27] 王研峰, 王聚杰, 尹宪志, 等. 祁连山云特征参数及人工增雨研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 434–443. [Wang Yanfeng, Wang Jujie, Yin Xianzhi, et al. Cloud characteristic parameters and artificial precipitation in the Qilian Mountains: Research progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 434–443.]

[28] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验[J]. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1057–1070. [Zheng Guoguang, Chen Yue, Chen Tianyu, et al. The observational study of summer orographic clouds structures of Qilian Mountains[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(10): 1057–1070.]

[29] 张杰, 张强, 田文寿, 等. 祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 722–727. [Zhang Jie, Zhang Qiang, Tian Wenshou, et al. Remote sensing retrieval and analysis of optical character of cloud in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 722–727.]

[30] 程鹏, 罗汉, 常祎, 等. 祁连山一次地形云降水微物理特征飞机观测[J]. 应用气象学报, 2021, 32(6): 691–705. [Cheng Peng, Luo Han, Chang Yi, et al. Aircraft measurement of microphysical characteristics of a topographic cloud precipitation in Qilian Mountains [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2021, 32(6): 691–705.]

[31] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 257–269. [Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(3): 257–269.]

[32] 尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 85–90. [Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28 (1): 85–90.]

[33] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3757–3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 (Z2): 3757–3771.]

[34] Lu Shan, Hu Zeyong, Yu Haipeng, et al. Changes of extreme precipitation and its associated mechanisms in Northwest China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(10): 1665−1681.

[35] 刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 等. 基于CloudSat/CALIPSO卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 847−858. [Liu Yimin, Yan Yafei, Lv Jianhua, et al. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 847−858.]

[36] Heng Zhiwei, Fu Yunfei, Liu Guosheng, et al. A study of the distribution and variability of cloud water using ISCCP, SSM/I cloud product, and reanalysis datasets[J]. Journal of Climate, 2014, 27(9): 3114−3128.

[37] 耿蓉, 王雨, 傅云飞, 等. 中国及其周边地区多种水凝物资料的气候态特征比较[J]. 气象学报, 2018, 76(1): 134−147. [Geng Rong, Wang Yu, Fu Yunfei, et al. Comparison of climatological characteristics of several hydrometeors in China and the surrounding region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(1): 134−147.]

[38] Yao Bin, Liu Chao, Yin Yan, et al. Evaluation of cloud properties from reanalyses over East Asia with a radiance-based approach[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(3): 1033−1049.

[39] 刘菊菊, 游庆龙, 周毓荃, 等. 基于ERA-Interim的中国云水量时空分布和变化趋势[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1590−1604. [Liu Juju, You Qinglong, Zhou Yuquan, et al. Spatiotemporal distribution and trend of cloud water content in China based on ERA-Interim reanalysis[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1590−1604.]

[40] Huai Baojuan, Wang Junyao, Sun Weijun, et al. Evaluation of the near-surface climate of the recent global atmospheric reanalysis for Qilian Mountains, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Atmospheric Research, 2021, 250(659): 105401.

[41] 赫小红, 宋敏红, 周梓萱. 夏季青藏高原空中云水资源的时空特征分析[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1339−1347. [Hao Xiaohong, Song Minhong, Zhou Zixuan. Temporal and spatial characteristics of water vapor and cloud water over the Qinghai-Xizang Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(6): 1339−1347.]

[42] Zhou Yuquan, Cai Miao, Tan Chao, et al. Quantifying the cloud water resource: Basic concepts and characteristics[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(6): 1242−1255.

[43] Hersbach H. The ERA5 atmospheric reanalysis[C]//American Geophysical Union. AGU Fall Meeting Abstracts. American: AGUFM, 2016: NG33D-01.

[44] Ecmwf. IFS Documentation CY41R2- Part II: Data Assimilation [EB/OL]. https: //www.ecmwf.int/node/16666, 2016.

[45] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1035−1045. [Huang Ronghui, Chen Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1035−1045.]

[46] Seo E K, Liu G. Determination of 3D cloud ice water contents by combining multiple data sources from satellite, ground radar, and a numerical model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(11): 1494−1504.

[47] 蔡淼, 周毓荃, 欧建军, 等. 三维云场分布诊断方法的研究[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1330−1344. [Cai Miao, Zhou Yuquan, Ou Jianjun, et al. Study on diagnosing three dimensional cloud region [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(5): 1330−1344.]

[48] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季6~8月云水含量的垂直分布特征[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 89−101. [Yang Dasheng, Wang Pucai. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(1): 89−101.]

[49] 丁晓东, 黄建平, 李积明, 等. 基于主动卫星遥感研究西北地区云层垂直结构特征及其对人工增雨的影响[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 529−538. [Ding Xiaodong, Huang Jianping, Li Jiming, et al. Study on cloud vertical structure feature over Northwest China based on active satellite remote sensing and its influence on precipitation enhancement[J]. Arid Meteorology, 2012, 30(4): 529−538.]

[50] 张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 东亚地区云微物理量分布特征的CloudSat卫星观测研究[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 235−248. [Zhang Hua, Yang Bingyun, Peng Jie. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the cloudSat dataset[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 235−248.]

[51] 潘留杰, 张宏芳, 周毓荃, 等. 1979—2012年夏季黄土高原空中云水资源时空分布[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 456−463. [Pan Liujie, Zhang Hongfang, Zhou Yuquan, et al. Spatial-temporal distribution of summer cloud water resources over the Loess Plateau from 1979 to 2012[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 456−463.]

[52] 张晓, 段克勤, 石培宏. 基于CloudSat卫星资料分析青藏高原东部夏季云的垂直结构[J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1073−1080. [Zhang Xiao, Duan Keqin, Shi Peihong. Cloud vertical profiles from CloudSat data over the eastern Tibetan Plateau during summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(6): 1073−1080.]

[53] Zhang Hongli, Zhang Qiang, Yue Ping, et al. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2016, 121(23): 13901−13918.

[54] 张强, 岳平, 张良, 等. 夏季风过渡区的陆-气相互作用: 述评与展望[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 758−773. [Zhang Qiang, Yue Ping, Zhang Liang, et al. Land-atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(4): 758−773.]

[55] 陈乾, 陈添宇, 肖宏斌. 祁连山区夏季降水过程天气分析[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 26−31. [Chen Qian, Chen Tianyu, Xiao Hon-

gbing. Synoptic analysis of summer precipitation over Qilian Mountains[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1): 26–31.]

[56] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 913–926. [Hong Yanchao, Zhou Feifei. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 913–926.]

[57] 张正国, 简悦, 李宇中, 等. 基于ERA5资料的广西地区云水资源评估[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 806–814. [Zhang Zhengguo, Jian Yue, Li Yuzhong, et al. Assessment of cloud water resources of Guangxi based on ERA5 data[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(5): 806–814.]

[58] 陶玥, 李军霞, 党娟, 等. 北京一次积层混合云系结构和水分收支的数值模拟分析[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 445–460. [Tao Yue, Li Junxia, Dang Juan, et al. A numerical study on precipitation process and moisture budget of stratiform and embedded convective cloud over Beijing area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 445–460.]

[59] 张玉欣, 马学谦, 韩辉邦, 等. 2014—2018年青海省云水资源时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1254–1262. [Zhang Yuxin, Ma Xueqian, Han Huibang, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics of cloud water resources in Qinghai Province from 2014 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1254–1262.]

[60] 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 421–434. [Zhang Pei, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. Study of the characteristics of atmospheric water resources and hydrometeor precipitation efficiency over the Liupan Shan area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(2): 421–434.]

[61] 周非非, 洪延超, 赵震. 一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究[J]. 气象学报, 2010, 68(2): 182–194. [Zhou Feifei, Hong Yanchao, Zhao Zheng. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform cloud system[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(2): 182–194.]

[62] 位晶, 段克勤. 基于卫星资料的秦岭南北云系及其垂直结构特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 777–785. [Wei Jing, Duan Keqin. Analysis of cloud system and its vertical structure between the southern and northern Qinling based on satellite data[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 777–785.]

[63] Cheng Jingya, You Qinglong, Zhou Yuquan, et al. Increasing cloud water resource in a warming world[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(12): 124067.

[64] 李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1094–1106. [Li Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(5): 1094–1106.]

[65] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资源的时空分布特征[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 905–912. [Chen Yonghang, Huang Jianping, Chen Changhe, et al. Temporal and spatial distributions of cloud water resources over northwestern China[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(6): 905–912.]

[66] 宋松涛, 张武, 陈艳, 等. 中国西北地区近20年云水路径时空分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 787–793, 798. [Song Songtao, Zhang Wu, Chen Yan, et al. Temporal and spatial distributions of cloud water path over northwestern China in the recent 20 years[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Editim), 2013, 49(6): 787–793, 798.]

[67] 伯玥, 王艺, 李嘉敏, 等. 青藏高原地区云水时空变化特征及其与降水的联系[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1679–1690. [Bo Yue, Wang Yi, Li Jiamin, et al. Temporal and spatial variation features of cloud water and its relation to precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1679–1690.]

[68] 刘菊菊, 李天江, 卫玮. 气温变化对中国夏季云水量的影响[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 747–759. [Liu Juju, Li Tianjiang, Wei wei. The impact of temperature change on China's summer cloud water content[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(4): 747–759.]

[69] 刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中东亚干旱半干旱区气候影响研究进展 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1141–1152. [Liu Yuzhi, Wu Chuqiao, Jia Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia[J]. Science China: Earth Sciences, 2018, 48(9): 1141–1152.]

[70] 黄建平, 刘玉芝, 王天河, 等. 青藏高原及周边地区气溶胶、云和水汽收支研究进展[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1225–1240. [Huang Jianping, Liu Yuzhi, Wang Tianhe, et al. An overview of the aerosol and cloud properties and water vapor budget over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(6): 1225–1240.]

[71] 花婷, 王训明. 东亚干旱半干旱区沙漠化与气候变化相互影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 841–852. [Hua Ting, Wang Xunming. Research progresses on the interaction between desertification and climate change in arid and semiarid East Asia [J]. Progress in Geography, 2014, 33(6): 841–852.]

[72] 张晓, 段克勤, 刘焕才. 夏季念青唐古拉峰地区云结构分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 196–200. [Zhang Xiao, Duan Keqing, Liu Huancai. Study of the cloud structure over the Mount Nyainqêntanglha during summer[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 196–200.]

[73] 段婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 252–261. [Duan Jing, Mao Jietai. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 252–261.]

[74] Li Zhanqing, Niu Feng, Fan Jiwen, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation

[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(12): 888-894.

[75] 石睿, 王体健, 李树, 等. 东亚夏季气溶胶-云-降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 12-22. [Shi Rui, Wang Tijian, Li Shu, et al. The spatial and temporal characteristics of aerosol cloud precipitation interactions during summer in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 12-22.]

[76] Li Xiaofan, Li Tingting, Lou Linyun. Effects of doubled carbon dioxide on rainfall responses to radiative processes of water clouds [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(6): 1114-1126.

[77] 刘健, 王锡津. 主要卫星云气候数据集评述[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6): 654-665. [Liu Jian, Wang Xijin. Assessment on main kinds of satellite cloud climate datasets[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(6): 654-665.]

Characteristics of the difference in air water resources between the north and south slopes of the Qilian Mountains in the summer

BA Li[1,2], YIN Xianzhi[1], PANG Zhaoyun[1], CHENG Peng[3], LIU Weicheng[4], WANG Yanfeng[1]

(1. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Meteorological Service Center of Gansu Province, Lanzhou 730020, Gansu, China; 4. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: The different characteristics of air cloud water resources between the southern and northern slopes of the Qilian Mountains in the summer were studied using ERA5 reanalysis data with a high temporal and spatial resolution provided by ECMWF to provide a reference for the rational development of air water resources in this area. The water vapor condensation efficiency and water condensate precipitation efficiency were estimated. The results show the following: (1) the water vapor content on the southern slope is slightly lower compared to the northern slope in the summer on average, and the cloud water path on the southern slope is higher compared to the northern slope. The cloud liquid water content on the southern slope was rich below 500 hPa. The water vapor content and cloud liquid water content showed an upward trend in recent years, and the growth rate of the southern slope was higher compared to the northern slope. The cloud ice water content showed a decreasing trend, and the decreasing rate was higher in the northern slope compared to the southern slope. (2) The convergence and upflow of the low-level water vapor field caused by atmospheric circulation and topography play a key role in the distribution of cloud water resources in the Qilian Mountains. (3) The distribution of cloud water on the northern slope was more abundant compared to the southern slope with a west-northwest airflow pattern, and low water-bearing clouds were mainly present under different precipitation circulation patterns. Cloud thickness is deeper in southwest airflow patterns, and there is little difference between cloud water in the northern and southern slopes. (4) In the Qilian Mountains, especially on the southern slope, the cloud water resources in the air were relatively rich, and most of the water condensation fails to precipitate. Thus, there is a certain space for the development of air water resources. The uneven and variable distribution of cloud water resources requires a more targeted selection of operational areas and means in the development process.

Keywords: Qilian Mountains; north-south difference; cloud water